الفصل الأول

قوانين الحركة الدائرية

Laws of circular motion

نواتج التعلم المتوقعة :

فى نهاية هذا الفصل تكون قادرًا على أن:

- تستنتج قوانين الحركة فى دائرة.
- تستنتج قيمة العجلة المركزية وتحدد مفهومها.
- تستنتج قانون القوة الجاذبة المركزية.
- تحسب القوة الجاذبة المركزية.

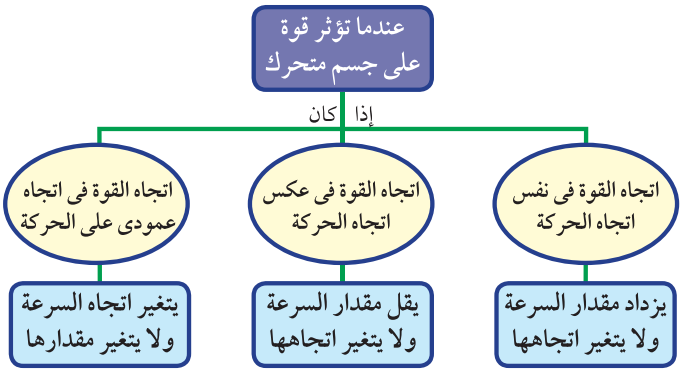
مصطلحات الفصل :

- الحركة الدائرية
  Circular Motion
- العجلة المركزية
  Centripetal Acceleration
- القوة الجاذبة المركزية
  Centripetal Force

مصادر التعلم الإلكترونية:

- **فيلم تعليمى:** مقدمة عن الحركة فى دائرة.
  http://www.youtube.com/watch?v=PBpe_LLlQJw
- **عروض عملية:** قانون الحركة فى دائرة.
  http://www.youtube.com/watch?v=Juz9m0BFX0I

من خلال دراستك لقانون نيوتن الثانى تعلمت أنه عندما تؤثر قوة على جسم متحرك بسرعة منتظمة فإنه يكتسب عجلة، أى يحدث تغير فى سرعته، ويعتمد التغير الحادث فى السرعة على اتجاه القوة المؤثرة بالنسبة لاتجاه الحركة، وذلك على النحو التالى:



فعندما يزيد المتسابق (٢) فى الشكل (١) من تدفق الوقود تكتسب الدراجة النارية قوة فى نفس اتجاه الحركة فتزداد سرعتها، أما عندما يضغط على الفرامل فإن القوة تكون فى عكس اتجاه الحركة فتقل السرعة، وعندما يميل المتسابق (١ أو ٣) بجسمه يمينًا أو يسارًا تتولد قوة عمودية على اتجاه الحركة، وبالتالى يتغير اتجاه الحركة ويسير فى مسار دائرى.

شكل (١) : الحركة فى مسارات منحنية

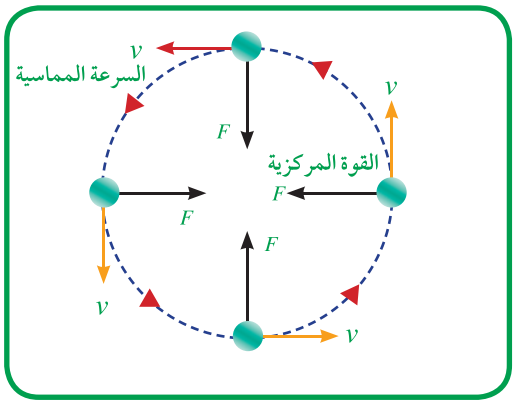
المعمل المصغر

الحركة فى دائرة:

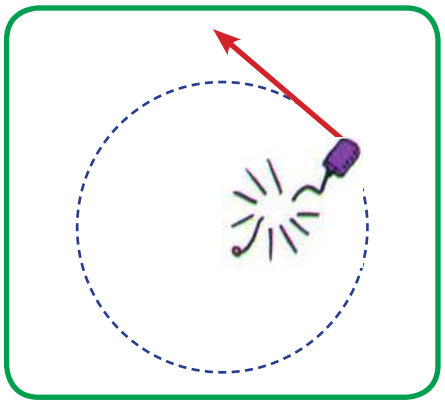
- اربط حجرًا صغيرًا بطرف خيط، وأمسك بيدك الطرف الآخر للخيط، ثم حرك الحجر فى مسار دائرى، أثناء ذلك قم بزيادة سرعة دوران الحجر، ماذا تلاحظ؟ اترك الخيط ليتحرك الحجر بحرية، فى أى اتجاه ينطلق الحجر؟

ونتوصل مما سبق أنه: (بيان الحركة فى دائرة)

- لكي يتحرك أى جسم فى مسار دائرى لابد أن تؤثر عليه قوة (F) عمودية على اتجاه حركته وفى اتجاه مركز الدائرة، وذلك لإجباره على الاستمرار فى الحركة الدائرية.
- إذا غابت هذه القوة فإن الجسم سوف ينطلق باتجاه المماس للمسار الدائرى الذى كان يسلكه لحظة الإفلات، وذلك بسرعة ثابتة فى المقدار والاتجاه (فى خط مستقيم) وتسمى هذه السرعة بالسرعة المماسية (v).



شكل (٢) : اتجاه القوة والسرعة فى الحركة الدائرية



شكل (٣) : اتجاه حركة الجسم عند انقطاع الخيط

- **الحركة الدائرية المنتظمة:** هى حركة جسم فى مسار دائرى بسرعة ثابتة فى المقدار ومتغيرة فى الاتجاه، وتسمى القوة المؤثرة على هذا الجسم فى اتجاه المركز بالقوة الجاذبة المركزية.
- **القوة الجاذبة المركزية:** هى تلك القوة التى تؤثر باستمرار فى اتجاه عمودى على حركة الجسم فتحول مساره المستقيم إلى مسار دائرى.

المعمل المصغر

القوة الجاذبة المركزية:

شكل (٤) : لماذا لايخرج الماء من فوهة الدلو؟

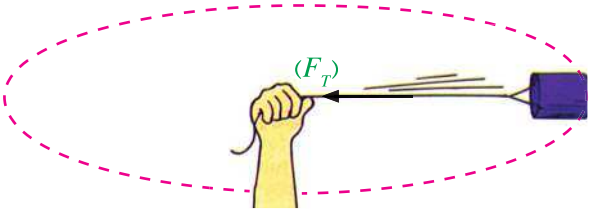
- قم بملء دلو إلى منتصفه بالماء وحركه فى دائرة رأسية بسرعة كافية، هل يخرج الماء من فوهة الدلو؟
- يمكن تفسير عدم خروج الماء من فوهة الدلو بأن القوة الجاذبة المركزية المؤثرة عليه تكون عمودية على اتجاه الحركة وبالتالى تعمل على تغيير اتجاه السرعة دون تغيير لمقدارها فتدور المياه فى المسار الدائرى وتبقى داخل الدلو.

١- أنواع القوى الجاذبة المركزية Types of Centripetal Forces

لا تعتبر القوة الجاذبة المركزية نوعًا جديدًا من القوى، فهي ببساطة الاسم المعطى لأي قوة تؤثر عموديًّا على مسار حركة الجسم وتجعله يتحرك فى مسار دائرى، فقد تكون القوة الجاذبة المركزية هى قوة شد، أو قوة تجاذب مادي ،... إلخ. وفيما يلى بعض أمثلة هذه القوى:

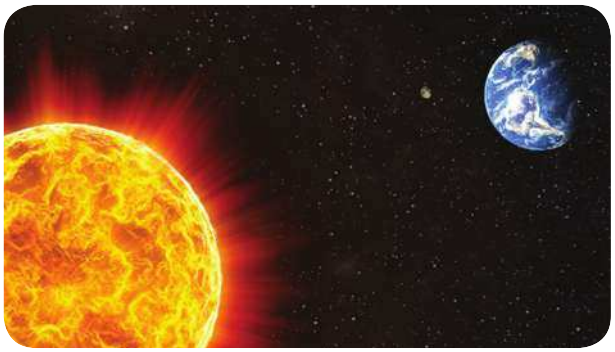
شكل (٥) : لماذا يشعر الرياضى بقوة شد فى ذراعية أثناء دورانه؟

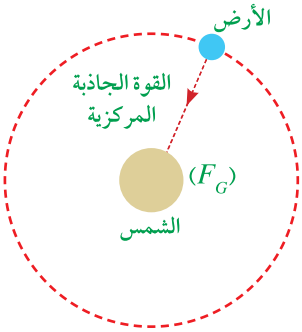
١-١ قوة الشد (F_T): عند سحب جسم باستخدام حبل أو سلك تنشأ فيه قوة شد، وعندما تكون هذه القوة فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة جسم يتحرك بسرعة ثابتة، فإنه يتحرك فى مسار دائرى، وتكون قوة الشد هى نفسها القوة الجاذبة المركزية.



شكل (٦) : تعمل قوة الشد فى الخيط كقوة جاذبة مركزية

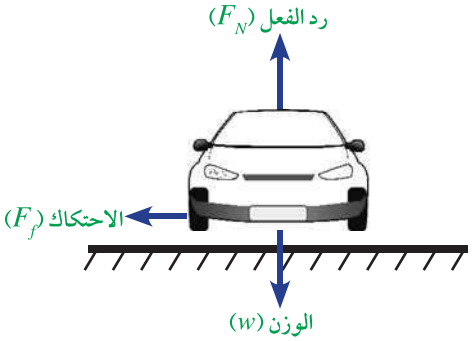
١-٢ قوة التجاذب المادى (F_G): تنشأ بين الأرض والشمس قوة تجاذب عمودية على اتجاه حركة الأرض، لذا تتحرك الأرض فى مسار دائرى حول الشمس.





شكل (٧) : تعمل قوة التجاذب المادى كقوة جاذبة مركزية

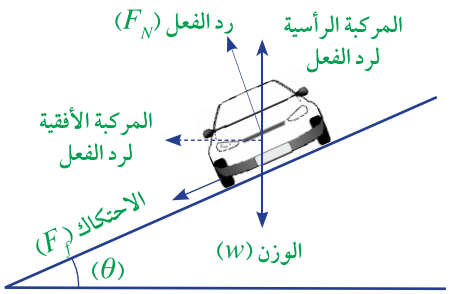
١-٣ قوة الاحتكاك (F_f): عندما تنعطف سيارة فى مسار دائرى أو منحنى تنشأ قوة احتكاك بين الطريق وإطارات السيارة، وتكون هذه القوة عمودية على اتجاه حركة السيارة وفى اتجاه مركز الدائرة وبالتالى تتحرك السيارة فى المسار المنحنى.



شكل (٨) : تعمل قوة الاحتكاك كقوة جاذبة مركزية

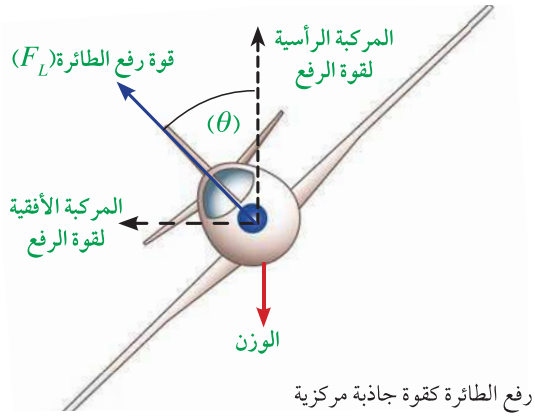
١-٤ قوة رد الفعل (F_N): تؤثر قوة رد الفعل دائمًا عموديًّا على السيارة، وفى حالة إذا كان المسار الدائري للسيارة مائلًا بزاوية على الأفقى تنتج مركبة أفقية لقوة رد الفعل باتجاه مركز الدائرة تساعد على دوران السيارة.

وفى هذه الحالة تكون القوة الجاذبة المركزية هى مجموع مركبة قوة رد الفعل الأفقية وقوة الاحتكاك باتجاه مركز الدوران.



شكل (٩) : القوة الجاذبة المركزية هى مجموع مركبتى رد الفعل والاحتكاك فى الاتجاه الأفقى

١-٥ قوة الرفع (F_L): تؤثر قوة رفع الطائرة دائما عموديا على جسم الطائرة، وعندما تميل الطائرة تنتج مركبة أفقية لقوة الرفع باتجاه مركز الدائرة فتكون هى القوة المركزية المؤثرة على الطائرة.

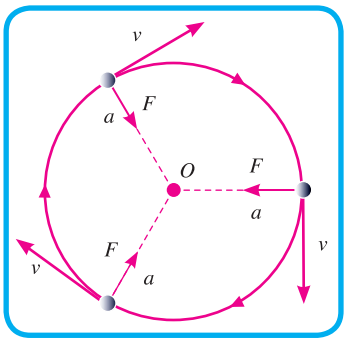


شكل (١٠) : تعمل المركبة الأفقية لقوة رفع الطائرة كقوة جاذبة مركزية

٢-العجلة المركزية Centripetal Acceleration

عندما تؤثر قوة مقدارها (F) عموديًّا على اتجاه حركة جسم كتلته (m) وسرعته (v) فإنه يتحرك فى مسار دائرى نصف قطره (r)، ويحدث تغير فى اتجاه السرعة، وبالتالى تكون للجسم عجلة (a) تسمى بالعجلة المركزية ويكون اتجاهها فى نفس اتجاه القوة الجاذبة المركزية.

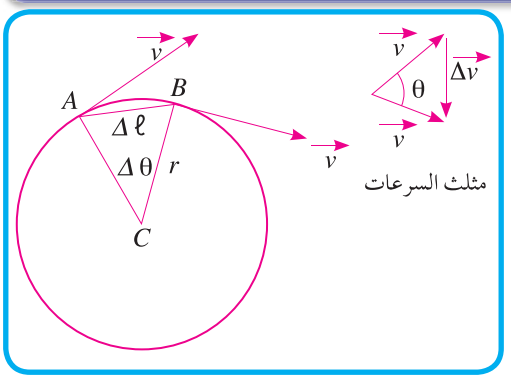
ويلاحظ من الشكل أن كلًّا من السرعة (v)، والقوة (F)، والعجلة (a) تكون ثابتة المقدار ولكنها متغيرة الاتجاه باستمرار.



شكل (١١) : متجه السرعة ومتجه العجلة أثناء الحركة المنتظمة فى مسار دائرى

العجلة المركزية (a): هى العجلة التى يكتسبها الجسم فى الحركة الدائرية نتيجة لتغير اتجاه السرعة.

ويلاحظ من الشكل (١٢) أنه عند تحرك الجسم من النقطة (A) إلى النقطة (B) أن السرعة (v) تتغير فى الاتجاه، ولكن تحتفظ بمقدارها ثابتًا؛ وبذلك فإن التغير فى السرعة (Δv) ينتج عن التغير فى اتجاه السرعة فقط.



شكل (١٢) : حركة جسم من (A) إلى (B)

حساب قيمة العجلة المركزية:

من تشابه المثلث (CAB) مع مثلث السرعات المبين فى شكل (١٢) يمكن كتابة العلاقة الآتية:

$$\frac{\Delta \ell}{r} = \frac{\Delta v}{v} \qquad (1)$$

حيث Δv فى اتجاه مركز الدائرة

$$\therefore \Delta v = \frac{\Delta \ell}{r} \cdot v \qquad (2)$$

فإذا انتقل الجسم من النقطة (A) إلى النقطة (B) فى فتره زمنيه (Δt) فإن العجلة فى اتجاه المركز (a) تحسب بقسمة المعادلة (2) على (Δt):

$$\therefore a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = v \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \quad \frac{1}{r}$$

$\therefore$ وحيث أن $\frac{\Delta \ell}{\Delta t}$ يساوى (v) فإن العجلة المركزية تساوى:

$$\therefore a = \frac{v^2}{r} \qquad (3)$$

حساب قيمة القوة الجاذبة المركزية (F):

من قانون نيوتن الثانى تعطى القوة من العلاقة ($F = m\,a$) أى أن:

القوة المركزية أثناء الحركة الدائرية المنتظمة = الكتلة × العجلة المركزية

وبالتعويض عن قيمة العجلة المركزية من العلاقة (3) نجد أن:

$$\therefore F = m \times \frac{v^2}{r} \qquad (4)$$

حساب قيمة السرعة المماسية (v):

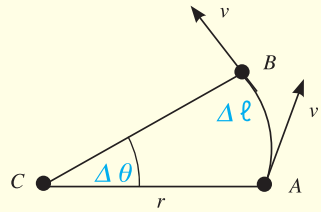
إذا افترضنا أن الجسم قام بعمل دورة كاملة فى المسار الدائري خلال زمن قدره (T) ويطلق على هذا الزمن مصطلح الزمن الدوري، وخلال هذا الزمن يكون قد قطع مسافة مقدارها محيط الدائرة وهو ($2\pi r$) وبالتالى يمكن حساب السرعة المماسية (سرعة الدوران) على النحو التالي:

$$v = \frac{\text{المسافة}}{\text{الزمن}} = \frac{2\pi r}{T}$$

معنى ذلك أنه يمكن حساب السرعة المماسية (v) بمعلومة كل من الزمن الدوري (T) ونصف قطر الدوران (r).

معلومة إثرائية

إذا تحرك جسم بسرعة مماسية (v) فى دائرة نصف قطرها (r) من النقطة (A) إلى النقطة (B) ليقطع مسافة (Δl) وزاوية قدرها ($\Delta \theta$) فى زمن قدره (Δt) فإن المقدار ($\frac{\Delta \theta}{\Delta t}$) يعرف بالسرعة الزاوية ($\omega$).



$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \qquad (1)$$

ومن المعروف أن قيمة الزاوية بالتقدير الدائرى تساوى النسبة بين طول القوس إلى نصف قطر المسار.

أى أن:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta \ell}{r}$$

وبالتعويض عن قيمة ($\Delta \theta$) فى المعادلة (1) نجد أن:

$$\omega = \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \times \frac{1}{r} = \frac{v}{r}$$

$$\therefore v = \omega r$$

$\therefore$ السرعة المماسية = السرعة الزاوية × نصف القطر

وحيث إن

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$\therefore \omega r = \frac{2\pi r}{T}$$

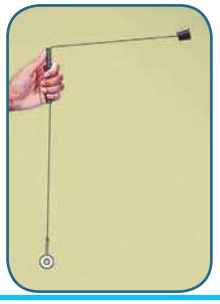
$$\therefore \omega = \frac{2\pi}{T}$$

المعمل المصغر

إثبات صحة علاقة القوة الجاذبية المركزية:

- اربط سدادة مطاطية كتلتها (m) فى خيط ثم مرر الخيط خلال أنبوبة معدنية أو بلاستيكية (مثل: أنبوبة القلم) وبعد ذلك اربط الطرف الآخر بثقل كتلته (M).
- عندما نحرك قطعة المطاط فى مسار دائرى فإن القوة الجاذبة المركزية تنشأ من قوة شد الخيط (F_T) والذي يساوى وزن الثقل المعلق. أى أن: $F = F_T = Mg$
- باستخدام المواد السابقة وساعة إيقاف أثبت عمليًّا صحة العلاقة: $F = Mg = m\frac{v^2}{r}$

أدوات التجربة



مثال محلول

فى التجربة السابقة كانت كتلة السدادة المطاطية $(13\ g)$، وأديرت السدادة فى مسار دائرى أفقي نصف قطره $(0.93\ m)$ لتصنع $(50$ دورة$)$ فى زمن قدره $(59\ s)$ ، احسب كتلة الثقل المعلق فى الطرف الآخر للخيط.

الحل:

حساب الزمن الدورى:

$$T = \frac{\text{الزمن الكلى}}{\text{عدد الدورات}} = \frac{59}{50} = 1.18\ s$$

حساب السرعة:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times 0.93}{1.18} = 4.9\ m/s$$

حساب قوة الشد:

$$F = m\frac{v^2}{r} = 0.013 \times \frac{(4.9)^2}{0.93} = 0.34\ N$$

حساب كتلة الثقل:

$$M = \frac{F}{g} = \frac{0.34}{9.8} = 0.035\ kg$$

العوامل التى تتوقف عليها القوة الجاذبة المركزية:

من الضروري حساب القوة الجاذبة المركزية عند تصميم منحنيات الطرق والسكك الحديدية، وذلك لكي تتحرك السيارات والقطارات فى هذا المسار المنحنى دون أن تنزلق، ومن خلال دراسة العلاقة (4) يمكن التوصل إلى أن القوة الجاذبة المركزية تتوقف على العوامل التالية:

١ - كتلة الجسم (m): حيث تتناسب القوة الجاذبة المركزية طرديًّا مع الكتلة (عند ثبات v ، r)، فالقوة اللازمة لتتحرك دراجة فى مسار منحنى أقل من القوة اللازمة لتتحرك شاحنة فى نفس المسار، وهذا يفسر منع حركة سيارات النقل الثقيل على بعض المنحنيات الخطرة.

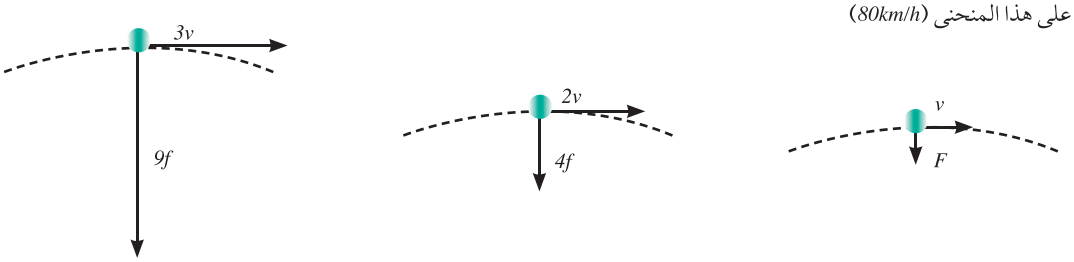
شكل (١٣) : لا يسمح بمرور المقطورات والشاحنات على بعض المنحنيات الخطرة، ما تفسير ذلك؟

شاهد فيلم على موقع الكتاب

لحظة إنزلاق سيارة من قمة منحدر

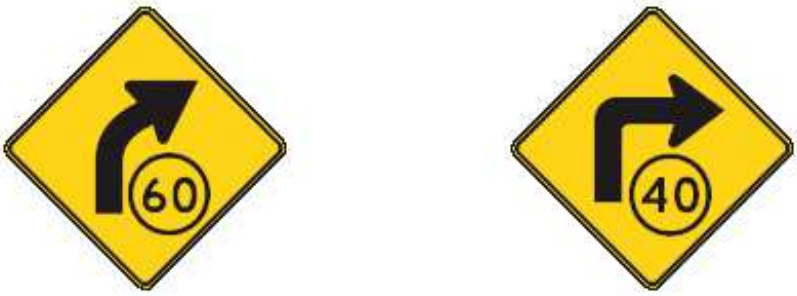
شكل (١٤) : السرعة القصوى على هذا المنحنى (80km/h)

٢ - السرعة المماسية (v): حيث تتناسب القوة المركزية طرديًّا مع مربع السرعة (عند ثبات m ، r)، فكلما زادت سرعة السيارة احتاجت لقوة جاذبة مركزية أكبر للحركة على المسار المنحنى، لذلك يحدد مهندسو الطرق سرعة معينة للحركة عند المنحنيات لا ينبغى تجاوزها.



شكل (١٥) : تاثير تغير سرعة جسم يتحرك فى مسار منحنى على مقدار القوة المركزية

٣ - نصف قطر الدوران (r): حيث تتناسب القوة المركزية عكسيًّا مع نصف قطر المسار (عند ثبات m ، v)، فكلما قل نصف قطر المنحنى احتاجت السيارة لقوة مركزية أكبر لتدور فيه، وبالتالى تزداد خطورة هذا المنحنى، ولتجنب ذلك ينبغي السير بسرعة صغيرة على المنحنيات الخطرة.



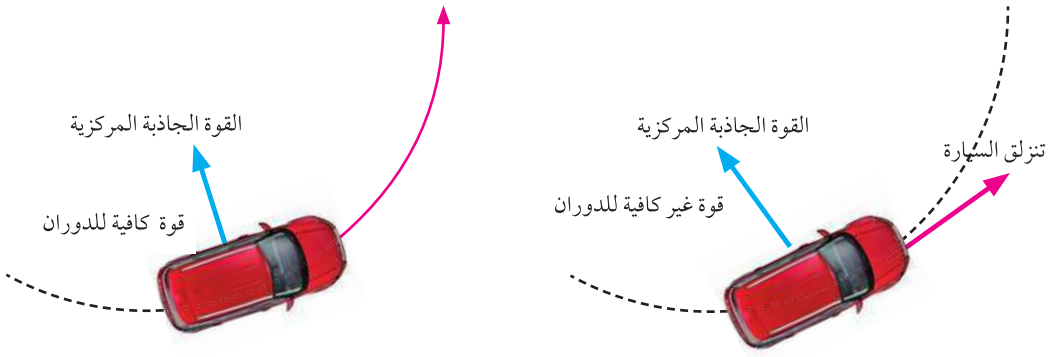
شكل (١٦) : لماذا تكون السرعة القصوى (40km/h) على المنحنى الأقل فى نصف القطر وتكون (60km/h) على المنحنى الأكبر فى نصف القطر؟

ما تأثير تناقص القوة المركزية على نصف قطر الدوران؟

عندما تتناقص القوة المركزية فإن هذا يعنى أن نصف القطر سيزداد؛ وذلك لأن $(F \propto \frac{1}{r})$ ، أى أن الجسم سيبتعد عن مركز الدائرة، وإذا أصبحت القوة المركزية صفرًا فإنه سيتحرك فى خط مستقيم بسبب القصور الذاتى.

فإذا افترضنا أن سيارة تتحرك على مسار منحنى وكان الطريق لزجًا فإن قوى الاحتكاك تكون غير كافية لإدارة السيارة فى المسار المنحنى فتنزلق السيارة وتزحف الإطارات على الطريق الجانبى، ولا يمكن للسيارة أن تستمر فى المسار المنحنى.

شكل (١٧) : لماذا تنطلق شظايا المعدن المتوهجة باتجاهات مستقيمة وبسرعات مماسية عند استعمال حجر المسن الكهربائى؟



شكل (١٨) : تنزلق السيارة خارج المسار المنحنى إذا كانت القوة الجاذبة المركزية غير كافية

أنشطة خارج حجرة الدراسة:

قم بزيارة إدارة المرور فى محافظتك وذلك للتعرف على الجهود التى يبذلها رجال المرور فى خدمة المواطنين، وكذلك تعرف أهم أسباب حوادث الطرق وكيفية الوقاية منها.

تطبيقات حياتية

✦ يستفاد من ظاهرة حركة الأجسام بعيدًا عن المسار الدائري عندما تكون القوة الجاذبة المركزية غير كافية للحركة فى المسار الدائرى فى العديد من التطبيقات الحياتية والتى منها تجفيف الملابس، وصنع غزل البنات، ولعبة البراميل الدوارة فى الملاهى ..... ففى تجفيف الملابس على سبيل المثال نجد أن جزيئات الماء ملتصقة بالملابس بقوة معينة، وعند دوران المجفف بسرعة كبيرة تكون هذه القوة غير كافية لإبقاء الجزيئات فى مدارها، وبالتالى تنطلق باتجاه المماس لمحيط دائرة الدوران وتنفصل عن الملابس.

شكل (١٩) : عند دوران المجفف بسرعة كبيرة تنطلق جزيئات الماء باتجاه المماس لمحيط دائرة الدوران

مثال محلول

حجر كتلته *(600 g)* مربوط فى خيط طوله *(10 cm)* ويدور بسرعة *(3 m/s)* احسب القوة الجاذبة المركزية، وما الذى تتوقع حدوثه إذا كانت أقصى قوة شد يتحملها الخيط هى *(50 N)* ؟

الحل:

حساب القوة الجاذبة المركزية:

$$F = m\frac{v^2}{r} = 0.6 \times \frac{(3)^2}{0.1} = 54\ N$$

وحيث إن القوة الجاذبة المركزية أكبر من أقصى قوة شد يتحملها الخيط لذا فإنه سينقطع ويتحرك الحجر فى خط مستقيم باتجاه المماس للمسار الدائري الذى كان يسلكه لحظة انقطاع الخيط.